

**Zeitschrift:** Eclogae Geologicae Helvetiae  
**Herausgeber:** Schweizerische Geologische Gesellschaft  
**Band:** 49 (1956)  
**Heft:** 1

**Artikel:** Sedimentpetrographische und tonmineralogische Untersuchungen an Bentoniten der Schweiz und Südwestdeutschlands  
**Autor:** Hofmann, Franz  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-162069>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# **Sedimentpetrographische und tonmineralogische Untersuchungen an Bentoniten der Schweiz und Südwestdeutschlands**

Von **Franz Hofmann**, Schaffhausen.

(Thermoanalytischer Beitrag von R. IBERG, Neuhausen a. Rhf.)

Mit 4 Figuren und 8 Tabellen im Text.

---

Die vom Verfasser 1947 W Bischofszell in der Obern Süsswassermolasse entdeckten Bentonit- und Glastuffhorizonte sind nicht die einzigen des westlichen, nordalpinen Molassebeckens geblieben. H. A. HAUS konnte in der Gegend ENE Überlingen, NE des Bodensees, ähnliche Vorkommen nachweisen, und neuerdings sind auch aus dem Gebiet der zürcherisch-aargauischen Molasse gleichartige Bentonithorizonte aufgefunden worden (U. BÜCHI, N. PAVONI). Ein geologisch besonders wichtiges Bentonitniveau konnte im Vulkangebiet des Hegau nachgewiesen werden (F. HOFMANN, siehe unter I). Zur Ergänzung sei an die bayrischen Bentonite erinnert, die z. T. schon seit langem bekannt sind (Bleicherden von Landshut).

Eine vergleichende Untersuchung der verschiedenen Bentonithorizonte der Schweiz und Baden/Württembergs erschien von grossem Interesse und hat denn auch zu wichtigen Erkenntnissen geführt, die in dieser Arbeit dargestellt sind.

## **I. EIN BENTONITVORKOMMEN AM HEILSBURG IM HEGAU (SÜDBADEN)**

### **A. Lage**

Das vom Verfasser 1955 nachgewiesene Vorkommen von Bentonitton liegt auf der Ostseite des *Heilsbergs*, N Gottmadingen (W Singen), am Wegeinschnitt bei «r» von «Riedernhölzle» (gilt für die badische Landeskarte und für die schweizerische Siegfriedkarte). Schweiz. Koordinaten: 700,980/289,700/520.

Es handelt sich um das schon von L. ERB (1931) erwähnte «Tuffitvorkommen», das aber damals als ausgebleichter tuffitischer Mergel beschrieben wurde. Auf Grund der Erfahrungen von Bischofszell trat der Verdacht auf, es könnte sich um Bentonit handeln. Die Schürfung an der nicht mehr aufgeschlossenen Stelle bestätigte die Vermutung.

### **B. Geologische Situation**

Das Vorkommen liegt auf der Höhe der Basis der Deckentuffe des obermiozänen Hegauvulkanismus (ERB, 1931). Es wird unterlagert von «Haldenhofmer-

geln», die hier über den tiefer am Hang aufgeschlossenen Glimmersanden liegen. Der Schlämmrückstand dieser liegenden, braunen Mergel ist reich an Bohnerzkörnchen und Schwamm- und Bryozoenresten, wie dies auch bei den übrigen «Haldenhofmergeln» am Hohenstoffeln, E Thayngen und im eigentlichen Juranagelfluhgebiet der Fall ist. Diese Stelle ist ein weiterer Beweis dafür, dass die «Haldenhofmergel» des Hegaus nicht über den Glimmersanden, sondern als Produkt der Juranagelfluhschüttung neben den Glimmersanden liegen (HOFMANN, 1956). Sie sind mit den Sanden der Ost-West-Schüttung verkeilt, analog wie dies auf der S-Seite der Glimmersandrinne mit den Mergeln und Knauersanden der Hörnlischüttung der Fall ist (HOFMANN, 1955a).

Über dem Bentonit liegt ein entkalkter Ton, der auf Grund des Schlämmrückstandes ebenfalls aus «Haldenhofmergel» hervorgegangen sein muss.

Die Aufschlussverhältnisse sind derart schlecht, dass vorläufig keine weiteren Angaben über Lagerungsdetails möglich sind. Glastuffe wurden nicht beobachtet. Die Mächtigkeit dürfte um 50 cm betragen.

## II. UNTERSUCHTE BENTONITVORKOMMEN

### A. Bischofszell-Niederhelfenschwil

Reines Material stand aus dem Probeabbau zur Verfügung, der 1949/50 durch die Firma Georg Fischer Aktiengesellschaft, Schaffhausen, durchgeführt wurde. Der Stollenbau vermittelte einen wesentlich besseren Einblick in das Vorkommen, und es konnte folgendes Profil festgestellt werden:

Hangendes: gelbgraue Mergel	
<i>Bentonit</i> , obere Schicht, teilweise gegen oben durch Molassemergel aufgearbeitet . . . . .	40–60 cm
Scharfe Trennungsfläche	
Glastuff, weich, stark zersetzt . . . . .	5–10 cm
Scharfe Trennungsfläche . . . . .	
Glastuff, hart . . . . .	10 cm
Scharfe Trennungsfläche	
Glastuff, hart . . . . .	80 cm
Scharfe Trennungsfläche (als Stollendach benützt) . . . . .	
Glastuff, hart, klüftig . . . . .	70 cm
Scharfe Trennungsfläche	
Glastuff, hart, stark zerklüftet . . . . .	3 cm
Scharfe Trennungsfläche	
<i>Bentonit</i> , untere Schicht, oben massig, Basisregion mit Scherflächen durchsetzt . . . . .	30–60 cm
Liegendes: 3–5 cm grüner Mergel, darunter graugrüne Mergel	

Grundsätzlich lassen sich also wenigstens drei verschiedene Bildungen unterscheiden: Bentonit-Glastuff-Bentonit, und damit wenigstens drei deutlich getrennte Phasen der Entstehung.

Es wurde Bentonit der obern und der untern Schicht untersucht. Der Glastuff selbst eignete sich nur in vereinzelten Fällen zur Einbeziehung in die Untersuchung. Eine frühere Untersuchung (HOFMANN, GEIGER & SCHWARZACHER, 1949) bezog sich ausschliesslich auf den untern Bentonit von Bischofszell.

### B. Jonentobel (Kt. Aargau)

Material der verschiedenen Lokalitäten zwischen Albiskette und Reuss wurde freundlicherweise von Herrn Dr. U. BÜCHI, Zürich, zur Verfügung gestellt. Voruntersuchungen zeigten, dass das Vorkommen im untern Jonentobel (BÜCHI, 1956) besonders rein ist, während die übrigen Lokalitäten Material enthalten, das insbesondere in der mineralogisch wichtigen Sandfraktion eine so starke Beeinflussung durch Molassematerial zeigt, dass eine sichere Diagnose schwierig oder ganz unmöglich war. Sämtliche Vorkommen sind sehr geringmächtig (Jonentobel ca. 13 cm).

### C. Heilsberg, Hegau

Es wurde reines Material aus der Schürfung des Verfassers (siehe unter I) untersucht.

### D. Heiligenberg

Das Vorkommen am Heiligenberg liegt auf K. 695 m, unter der Schwedenschanze, ob Frickingen, ENE Überlingen, Baden/Württemberg. Untersuchungsmaterial aus dem wenig mächtigen Vorkommen (ca. 15 cm), das in gelbe Molassemergel eingelagert ist, wurde anlässlich einer gemeinsamen Begehung mit Herrn Dr. HAUS, Überlingen (Bodensee), gewonnen. Herrn Dr. HAUS sei an dieser Stelle für die Überlassung des Vorkommens zur Untersuchung bestens gedankt.

## III. VERGLEICHENDE SEDIMENTPETROGRAPHISCHE UND TONMINERALOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

### A. Allgemeines

Sämtliche untersuchten Tone sind definitionsgemäss *Bentonite, d. h. Tone, die aus glasigem vulkanischem Material (Aschen) in situ entstanden sind*. Die Interpretation der tonmineralogischen Untersuchung wird jeweils meist im Anschluss an die Darstellung der einzelnen Ergebnisse gegeben, während die aus der gesamten Untersuchung zu ziehenden Folgerungen unter IV dargestellt sind.

Im Einvernehmen mit der Direktion der Georg Fischer Aktiengesellschaft, Schaffhausen, konnten die einschlägigen Untersuchungen im Formstofflaboratorium der genannten Firma ausgeführt werden, wofür ihr an dieser Stelle der beste Dank ausgesprochen sei.

Herr Dr. ROLF IBERG, Neuhausen am Rheinfall, besorgte die differentialthermoanalytischen Untersuchungen und deren Auswertung, wofür ihm ebenfalls bestens gedankt sei.

### B. Einzelne Untersuchungen

#### 1. Makroskopische Kennzeichnung

Die verschiedenen Typen sind makroskopisch durchaus gleich beschaffen. Es handelt sich um seifig anzuführendes, graublaues, bisweilen grünliches oder gelbliches Material, das sich von gewöhnlichen Mergeln deutlich unterscheidet. Die



Beschaffenheit ist bergfeucht eher talkähnlich-seifig. Da die untersuchten Bentonite an Ort und Stelle ohne Verschwemmung aus windabgelagerter Asche hervorgegangen sind, ist die Struktur massig.

Stellenweise, besonders bei wenig mächtigen Lagen (Zürich-Aargau, Heiligenberg) oder an der Basis der untern Bischofszeller Schicht, ist der Ton stark mit Scherflächen durchsetzt, wohl als Folge kleiner Kriechbewegungen und Druckwirkungen, möglicherweise unterstützt durch Quellvorgänge.

Bei den Vorkommen der zürcherisch-aargauischen Molasse wurden vereinzelt vollkommen zu Ton umgewandelte Partien mit völlig erhaltener Glastuffstruktur beobachtet.

## 2. Differentialthermoanalyse (DTA)<sup>1)</sup>

### a. Interpretation der DTA-Kurven (von R. IBERG)

Die Thermokurven der untersuchten Bentonite sind in Figur 1 dargestellt.

Die Thermokurven der Proben *Jonentobel* (C) und *Heilsberg* (D) stimmen weitgehend überein und decken sich sehr gut mit den Thermokurven bekannter amerikanischer Bentonite.

Der erste endotherme Effekt bis 200° C entspricht dem Verlust des in Dreischichtsilikaten (Illit-Beidellit-Montmorillonit) eingelagerten molekularen Wassers. Der mineraltypische Haupteffekt mit der Spitze bei 650° C erscheint aber gegenüber dem Effekt bei reinem Montmorillonit bei tieferer Temperatur, wie dies z. B. für Beidellit typisch ist. Er zeigt den Verlust der OH-Gruppen im Kristallgitter an.

Für Montmorillonit sprechen der schwächere endotherme Effekt bei 830° C und die exotherme Reaktion bei 980° C. Der endotherme Effekt hängt mit dem endgültigen Zusammenbruch des Kristallgitters zusammen. Dieser könnte leicht mit der Karbonatreaktion verwechselt werden, was aber im vorliegenden Fall ausgeschlossen ist (Tab. I). Die exotherme Reaktion deutet Umkristallisationen an, z. B. Spinellbildung. Eine Verwechslung mit der exothermen Kaolinitreaktion ist auch hier unwahrscheinlich; Kaolinit ergibt zudem eine viel schärfere Spitze.

Eine geringe Beimengung von Illit ist nicht ausgeschlossen, wenn man die sehr schwache endotherme Inflexion der Thermokurve C und die Verbreiterung des Hauptausschlages der Thermokurve D berücksichtigt. Die kleinen endothermen Störungen bei 360° C bzw. 400° C deuten auf die mutmassliche Anwesenheit von Eisenoxyd-Hydraten der Limonit-Goethit-Serie.

Im ganzen gesehen sind also die Bentonite vom Jonentobel und vom Heilsberg montmorillonitisch-beidellitische Tone.

Die Thermodiagramme des *oberen* (A) und des *unteren Bischofszeller Bentonits* (B) stimmen in den Thermoeffekten überein, sind aber in den Intensitäten derselben voneinander verschieden. Dies deutet auf verschiedene Mischungsverhält-

<sup>1)</sup> Die Differentialthermoanalyse ist eine wichtige Methode zur Untersuchung von Tonmineralien. Sie beruht auf der Messung von Temperaturdifferenzen zwischen der Messprobe und einer thermisch inerten Vergleichssubstanz (Ofentemperatur), wenn beide gleichzeitig und kontinuierlich auf 1000° C erhitzt werden. Unterliegt dabei die Messprobe einer Veränderung, so äussert sich dies in einer Wärmeaufnahme oder Wärmeabgabe. Die Probe wird gegenüber der Vergleichssubstanz kühler oder wärmer. Erhitzen sich beide Substanzen in gleichem Masse, so wird keine Reaktion wahrgenommen (nach R. IBERG, 1954).

nisse der enthaltenen Tonmineralien hin. Die Thermokurven lassen deutlich die endothermen Reaktionen von Illit bei 520° C und Beidellit-Montmorillonit bei 650° C erkennen. Beurteilt nach der Intensität der Reaktionen dürfte hier

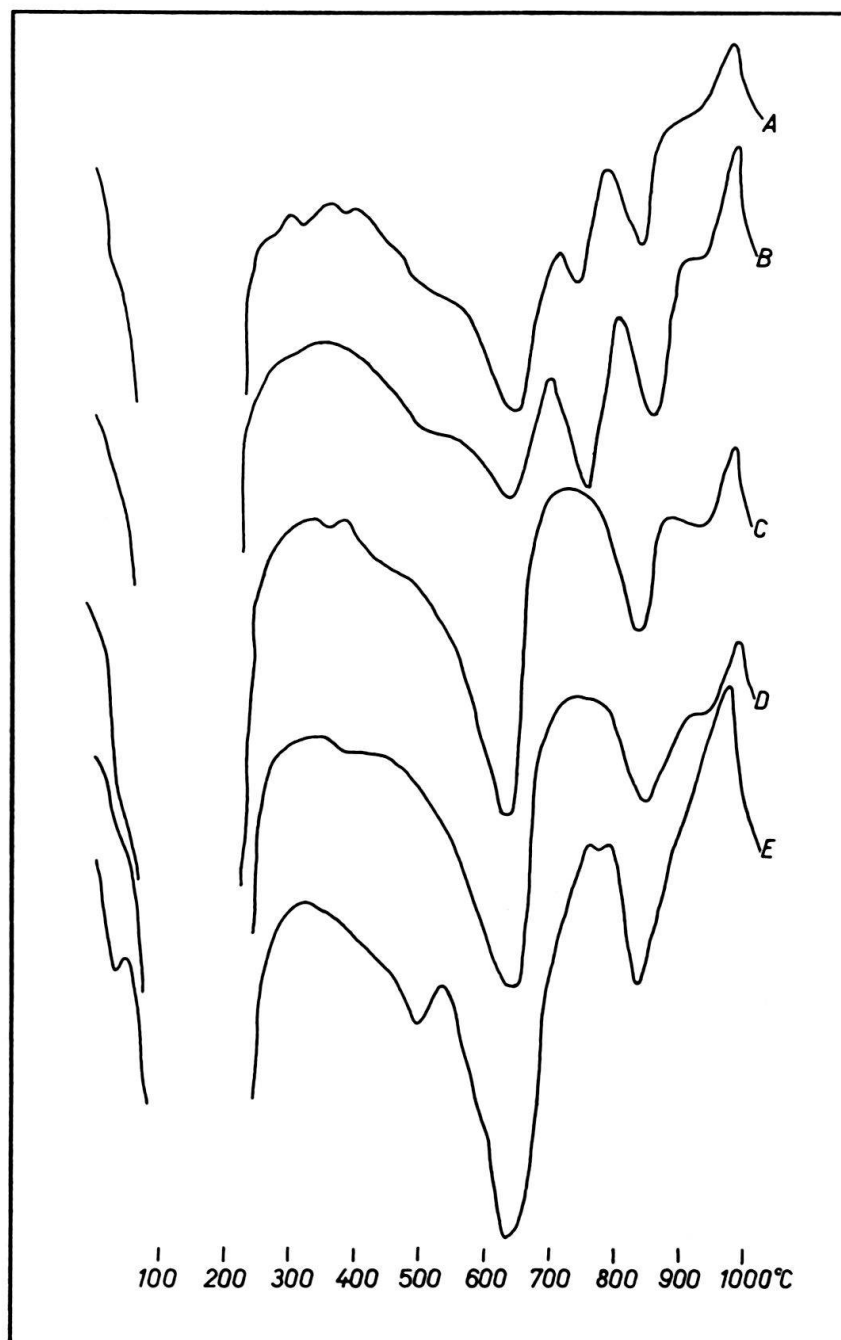


Fig. 1. Differentialthermoanalytische Kurven der untersuchten Bentonite. *A* Bischofszell, obere Schicht, *B* Bischofszell, untere Schicht, *C* Jonentobel, *D* Heilsberg, *E* Heiligenberg.

mehr Illit vorhanden sein als in den Proben Jonentobel und Heilsberg. Der Anteil von Beidellit ist aber viel grösser als jener von Illit.

Für Montmorillonit s.str. werden zwei weitere Reaktionen registriert, nämlich bei 750° C und 850° C. Der letztgenannte Effekt könnte aber auch als

Karbonateffekt interpretiert werden (Tab. I). Solche Montmorillonit-Doppeleffekte wurden oft bei gewissen mexikanischen und Mississippi-Bentoniten festgestellt.

Auffallend ist beim *obern Bischofszeller Bentonit* (A) die abgeschwächte Montmorillonitreaktion bei 730° C gegenüber derjenigen beim *untern Bischofszeller Ton* (B). Dies deutet darauf hin, dass der *untere Bentonit* bedeutend mehr Montmorillonit enthält als der obere. Es ist demnach gar nicht erwiesen, dass die beiden Thermoefekte auf Zersetzungsreaktionen des gleichen Tonminerals (Montmorillonit) zurückgeführt werden müssen, wie dies in der Literatur allgemein angenommen wird. Im Falle des obern Bischofszeller Tons müsste dann auch der zweite Effekt bei 850° C schwächer sein, was aber bei weitem nicht zutrifft. Es wäre nicht ausgeschlossen, dass diese Reaktion die Anwesenheit eines zusätzlichen Tonminerals der Montmorillonitserie anzeigt. Bekannt ist nämlich, dass Mg-Silikate, namentlich Hektorit und Antigorit, in diesem Temperaturbereich starken endothermen Reaktionen unterliegen.

Im untern Bischofszeller Bentonit scheinen noch Limonit-Goethit-Beimischungen enthalten zu sein.

Die Thermokurve der Probe *Heiligenberg* (E) lässt den Illit-Effekt bei 500° C deutlicher erscheinen, als dies bei allen bisher besprochenen Typen der Fall ist. Die übrigen Thermoefekte sind typisch für Tonmineralien der Montmorillonit-Beidellit-Serie. Besonderer Berücksichtigung bedarf der starke endotherme Aus Schlag bei 850° C, wie er bei Hektorit zum Vorschein kommt. Eine genaue Erklärung dafür muss vorderhand noch ausbleiben.

Das gleichzeitige Vorkommen von Illit, Beidellit und Montmorillonit nebeneinander in den untersuchten Bentoniten lässt vermuten, dass es sich um Tonmineralien verschiedener Entstehungsweise handeln muss. Das Unterscheiden zwischen einem Illit-Beidellit-Zyklus und einem Montmorillonit-Zyklus erscheint als berechtigte Annahme. Der Montmorillonit-Zyklus dürfte der ältere sein. Es ist kaum wahrscheinlich, dass die Verwitterung von Illit zu Montmorillonit als Endglied der Sukzession in der kurzen Zeit so weit fortschreiten konnte. Die Anwesenheit von Feldspat in Illit-Beidellit-haltigen Proben scheint dies zu bestätigen.

#### b) Die DTA-Ergebnisse in Beziehung zu den geologischen Verhältnissen

Die Bischofszeller Vorkommen wurden im direkten Einflussbereich der Hörnli-schüttung abgelagert. Insbesondere die obere Bentonitschicht zeigte – sehr gut aufgeschlossen in einem Aufbau im Stollen – von oben her Aufarbeitungserscheinungen durch die darüber abgelagerten Molassemergel und eine unverkennbare Infektion durch dieselben. Dadurch dürfte sich der geringere Montmorillonitgehalt erklären.

Beim Vorkommen Heiligenberg, das in dünner Schicht in Molassemergel liegt, dürfte der Illitgehalt mit einer ähnlichen Infektion zusammenhängen. In allen Fällen dürfte auch die mehr oder weniger starke Feldspatverwitterung nicht ohne Einfluss geblieben sein.

Primäres vulkanisches Mineral ist bei allen untersuchten Typen wohl der Montmorillonit, Illit stammt aus Molassemergel und teilweise evtl. aus der

Feldspatverwitterung (Tab. II und VII), während für die genetische Bedeutung des Beidellitanteils sichere Anhaltspunkte noch fehlen. Es scheint, dass er zusammen mit dem Illit sekundärer Art sein könnte (Mergel). Genaue tonmineralogische Untersuchungen an Molassemergeln wären in diesem Zusammenhang sehr erwünscht.

### 3. Karbonatgehalt

Der Karbonatgehalt, bestimmt mit dem Passon-Apparat, geht aus Tabelle I hervor.

Tabelle I

Karbonatgehalt der untersuchten Bentonite

Bischofszell, obere Schicht . . . . .	1–5%
Bischofszell, untere Schicht . . . . .	1–7%
Jonentobel . . . . .	0–1%
Heilsberg . . . . .	0%
Heiligenberg . . . . .	0%

Der stellenweise (besonders im NE-Teil) relativ hohe Karbonatgehalt der Bischofszeller Vorkommen hängt teilweise mit der Beeinflussung durch Molassemergelmaterial zusammen, teilweise mit sekundärer Kalkaufnahme oberflächennaher Partien im Einflussbereich von Bachtobeln mit kalkreichem Wasser.

### 4. Schlämmanalysen

#### a) Sedimentationsanalysen

Zur Feststellung der Kornverteilung wurden Sedimentationsanalysen nach der Pipettmethode durchgeführt. Als Dispergiermittel diente Natriumpyrophos-

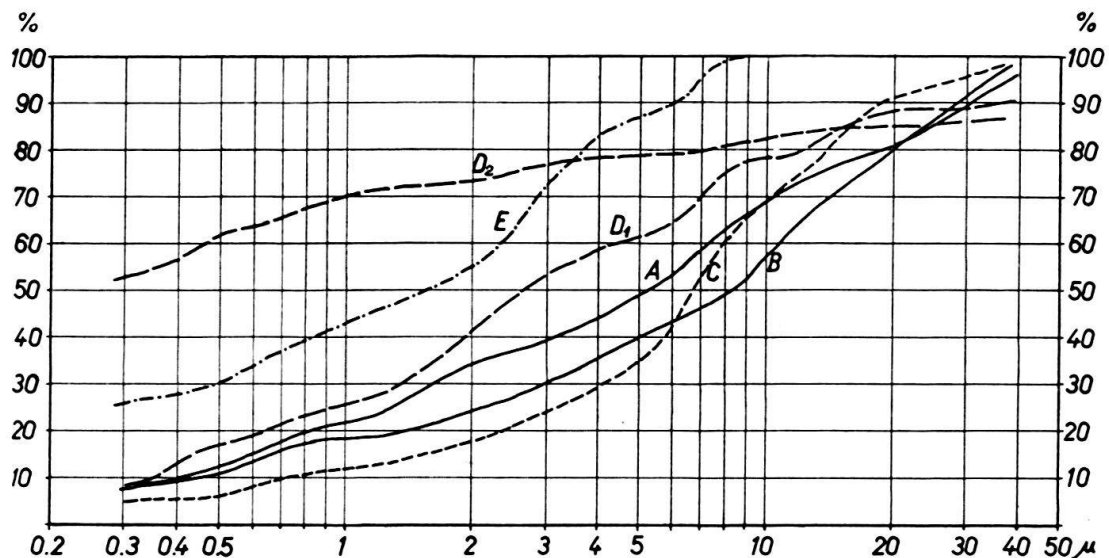


Fig. 2. Ergebnisse der Sedimentationsanalyse der untersuchten Bentonite in Summenkurvendarstellung. A Bischofszell, obere Schicht, B Bischofszell, untere Schicht, C Jonentobel, D<sub>1</sub> Heilsberg unbeh., D<sub>2</sub> Heilsberg, behandelt mit Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> (3%), E Heiligenberg. Mit Ausnahme von D<sub>2</sub> alle Bentonite im natürlichen Zustand.

phat ( $\text{Na}_4\text{P}_2\text{O}_7$ ) (VINTHER & LASSON, 1933). Selbstverständlich wurde ungemahlenes Material verwendet, das bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet worden war. Das spezifische Gewicht wurde allgemein mit 2,75 bestimmt. Die Ergebnisse zeigt Figur 2 in Summenkurvendarstellung. Allgemein sind die untersuchten Bentonite in natürlichem Zustand ausserordentlich grobdispers und zeigen durchwegs denselben Typus. Vom Bentonit des Heilsbergs wurde auch eine mit Soda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) «aktivierte» (basenausgetauschte) Probe untersucht (siehe unter 5), die wesentlich feiner dispers geworden ist.

Der überdurchschnittlich hohe Anteil der groben Fraktionen rührt wiederum davon her, dass die untersuchten Bentonite nicht durch Wasser verschwemmt wurden, sondern dass die Ablagerung aus der Luft ohne Beeinflussung durch solche Vorgänge vor sich ging. Diesem Umstand ist es zu verdanken, dass die Horizonte überhaupt auffindbar sind.

Auch das Vorhandensein von Montmorillonitpseudomorphosen nach vulkanischem Glas in Form von noch leicht erkenntlicher Glastuffstruktur in den eigentlichen Bentoniten (Kt. Zürich, Bischofszell) beweist die obgenannten Entstehungsbedingungen (siehe auch NEUWIRTH, 1953). Eine sekundäre «Mikro-Verschwemmung» hat höchstens an Ort und Stelle durch Niederschläge und auf Distanzen von nur Millimetern gewirkt und dadurch wohl auch die ursprüngliche Glastuffstruktur zerstört.

#### b) Abtrennung der Schlämmstoffe

Durch Abtrennen der Schlämmstoffe  $< 20\mu$  (Methodik siehe HOFMANN, 1955a) wurde der Anteil der «Sandfraktion»  $> 20\mu$  bestimmt. Ausgangsmaterial war Ton, der bei  $105^\circ\text{C}$  getrocknet worden war. Durch Kochen der Tonsuspension mit der zugesetzten Dispergierlösung (Natriumpyrophosphat) wird der grobdisperse Zustand (siehe Fig. 2) durch Basenaustausch rasch aufgehoben, so dass der Tonanteil tatsächlich vollkommen abgeschlämmt werden kann und nur noch gröbere nichttonige Körner übrigbleiben. Tabelle II zeigt das Ergebnis der Schlämmstoffabtrennung.

Ohne Vorhandensein von  $\text{Na}^+$  tritt die Feindispergierung beim Kochen nicht ein. Die weitaus beste Wirkung wird mit Natriumpyrophosphat erzielt, und es scheint, dass auch das Anion massgebend an der dispergierenden Wirkung beteiligt ist. Interessanterweise ist Natriumpyrophosphat ausserordentlich konzentrationsunempfindlich und wirkt auch noch in sehr starken Dosen dispergierend, was z. B. bei  $\text{NaOH}$  bei weitem nicht mehr der Fall ist.

Tabelle II

Nach der Schlämmstoffabtrennung verbleibende Kornfraktion  $> 20\mu$

Bischofszell, obere Schicht . . . . .	0,35%
Bischofszell, untere Schicht . . . . .	9,7 %
Bischofszell, untere Schicht, HCl-behandelt . . . . .	6,2 %
Jonentobel . . . . .	1,4 %
Heilsberg . . . . .	4,4 %
Heiligenberg . . . . .	1,36%

Die Sandfraktion der untern Bischofszeller Schicht enthält 6,2% nichtkarbonatische (vulkanische) Mineralkörner, der Rest sind vermutlich sekundär entstandene Kalzitkörnchen, die



bei der hangenden Schicht und bei den übrigen Vorkommen sehr selten sind (Jonentobel) oder ganz fehlen (Heilsberg und Heiligenberg).

Wichtig ist die Feststellung, dass der untere Bischofszeller Bentonit und derjenige vom Heilsberg einen relativ hohen Mineralkorngehalt, die übrigen Vorkommen aber einen sehr geringen Gehalt aufweisen.

Bei allen untersuchten Tönen sind die Mineralkörner des Schlämstoffrückstandes (Quarze, Feldspäte, Schwerermineralien) meist kleiner als 0,1 mm, nie aber grösser als 0,2 mm. Die Glimmer können etwas weniger grösser sein. Diese Beobachtung ist ein wichtiges Anzeichen für erheblichen Windtransport.

### 5. Basenaustauschvermögen und Quellfähigkeit

In Tabelle III ist das Basenaustauschvermögen der untersuchten Bentonite dargestellt, bestimmt nach dem  $\text{BaCl}_2$ -Verfahren.

Tabelle III

Basenaustauschvermögen der untersuchten Bentonite, bestimmt an ungemahlenem, bei 105° C getrocknetem Material.

#### *unbehandelte Bentonite*

Bischofszell, obere Schicht . . . . .	61,5 mval/100 g
Bischofszell, untere Schicht . . . . .	61,4 mval/100 g
Jonentobel . . . . .	62,0 mval/100 g
Heilsberg . . . . .	61,7 mval/100 g
Heiligenberg . . . . .	59,9 mval/100 g

#### *behandelte Bentonite*

Na-Heiligenberg (beh. mit NaCl) . . . . .	77,4 mval/100 g
K-Heiligenberg (beh. mit KCl) . . . . .	71,5 mval/100 g

Die karbonathaltigen Proben waren zuerst mit n/2 HCl entkalkt worden, um störende Einflüsse auszuschalten.

Sämtliche untersuchten Bentonitproben zeigen eine ausserordentliche enge Übereinstimmung der Basenaustauschfähigkeit.

Die mit  $\text{Na}^+$  und  $\text{K}^+$  behandelten Tone vom Heiligenberg zeigen, dass durch die stärkere Dispergierung (Fig. 2) auch die Umtauschkapazität erhöht wurde. Offenbar wurde dabei auch  $\text{K}^+$  noch nicht so fest ins Gitter eingebaut, dass es nicht weitgehend wieder hätte ausgetauscht werden können.

Die untersuchten Bentonite gehören durchwegs zum schwach quellenden Typus, der stark mit Ca- und Mg-Ionen abgesättigt ist. Rein qualitativ konnte durch Austausch mit  $\text{NH}_4\text{Cl}$  festgestellt werden, dass die relativ kalkreichen Bischofszeller Tone viel  $\text{Ca}^{++}$  und  $\text{Mg}^{++}$  etwa zu gleichen Teilen enthalten, während bei den andern Typen der Erdalkaligehalt geringer zu sein scheint. In dieser Richtung deutet eine chemische Analyse bei ERB (1931) für den Heilsberger Bentonit, mit 3%  $\text{K}_2\text{O}$ , 2,5%  $\text{Na}_2\text{O}$  und nur 2,1%  $\text{Ca} + \text{MgO}$ . Es scheint, dass  $\text{K}^+$  eine bedeutende Rolle spielt, insbesondere, weil es selektiv festgehalten und relativ schwer austauschbar eingebaut wird (GRIM, 1953).

Wie alle Bentonite, lassen sich auch die untersuchten Tone mit Soda in Na-Bentonite überführen. Dies gelingt aber bei den vorliegend untersuchten Typen nur durch Kochen und Eintrocknen des mit Soda behandelten Tonbreis. Dies hängt mit dem grobdispersen Charakter dieser Tone zusammen (Fig. 2), der ein sehr

träges Basenaustauschverhalten in kalter Suspension zur Folge hat. Bei feindispersen Bentoniten geht die dünnflüssige Suspension nach Sodazusatz schon in wenigen Sekunden in den hochviskosen Zustand über, der für Na-Bentonite typisch ist. Zur «Aktivierung» sind etwa 3% Soda zweckmässig, entsprechend der Umtauschkapazität der Montmorillonite. Soda hat den Vorteil, dass das  $\text{Ca}^{++}$  als  $\text{CaCO}_3$  ausgefällt und dadurch gebunden wird, wodurch der Austauschprozess viel rascher vor sich geht.

Figur 2 zeigt sehr deutlich, wie der durch Sodabehandlung hergestellte Na-Bentonit einen feindispersen Zustand mit hohem kolloidalem Anteil erreicht hat. In der Tat besitzen denn auch Suspensionen der mit Soda behandelten Molassebentonite hochviskose und -tixotrope Eigenschaften. Im Enslingerät wurde für getrockneten, unbehandelten Bentonit Heilsberg nach 48 Stunden eine Wasseraufnahme von 225 g / 100 g Ton, für Na-Bentonit Heilsberg eine solche von 482 g / 100 g Ton festgestellt. Die Wasseraufnahme des Na-Bentonits verläuft wegen der Quellung der untersten Schicht äusserst langsam, jene des Erdalkali-Bentonits aber äusserst schnell. Die Na-Behandlung bewirkt eine extrem feine Dispergierung (Fig. 2) und damit eine starke Zunahme der Kapillarität im Vergleich zu den unbehandelten Bentoniten. Dadurch und durch die gegenseitige Abstossung der Na-Ton-Partikel kann sich auch die innerkristalline Gitterquellung der Montmorillonite stärker auswirken. Diese Feststellungen setzen keine  $\text{Na}^+$ -Hydratation voraus. Sie entsprechen den heutigen Ansichten, wonach  $\text{Ca}^{++}$  und  $\text{Mg}^{++}$  in Tonen stark hydratisiert sind,  $\text{Na}^{++}$  aber kaum (GRIM, 1953; JASMUND, 1951). Auch die weiter unten aufgeführten Feststellungen decken sich völlig mit dieser Ansicht.

## 6. Ton-Wasser-System

### a) Zerfall in Wasser

Luftgetrocknete Stücke der in Frage stehenden Bentonite zerfallen in Wasser unter Aufblähung in einzelne, relativ grobkörnige Komponenten. Viel schneller geht dieser Zerfall nach vorhergehender Ofentrocknung bei mindestens 100° C vor sich, wobei der grösste Teil des Adsorptionswassers ausgetrieben wurde. Die durch den Gebirgsdruck relativ stark komprimierten Tone (Raumgewicht lufttrocken 2,0) zerfallen dabei in die einzelnen Tonaggregate, die ungefähr den Kornverteilungen von Figur 2 entsprechen dürften. Durch Behandlung getrockneter Tonstücke mit wenig Wasser kann eine Aufteilung mit mässig feuchtem bis fast trocken erscheinendem Endzustand erzielt werden. Beim nachfolgenden Trocknen bleibt die Aufteilung in die einzelnen Teilchen vollkommen erhalten, im Gegensatz zu feindispersen Tonen, insbesondere Na-Bentoniten. Auch dieses typische Verhalten zeigt, dass die einzelnen Partikel nicht durch Verschwemmung aufbereitet und nicht in Wasser abgesetzt worden waren. Sie verfügen nach der obenerwähnten Aufspaltung mit Wasser noch nicht über ein eigentliches Bindevermögen und wirken deshalb auch nicht als hochplastische, typische Tone. Dies werden sie erst durch mechanische Zerreibung (siehe auch unter 7), durch Feinvermahlung oder durch geeigneten Ionen-Austausch, in jedem Fall also durch Überführung in den feindispersen Zustand. Diese Erscheinungen stimmen sehr gut mit Beobachtungen



an österreichischen Bentoniten überein (NEUWIRTH, 1953). Auch die untersuchten Molassebentonite sind noch durchaus nach vulkanischem Glas pseudomorph.

#### b) Wasseraufnahme an der Luft

Interessante Ergebnisse ergaben Versuche, die die Wasseraufnahme der bei 105° C getrockneten Bentonite an der Raumluft unter gleichen Bedingungen überprüften (Tabelle IV), also die Hygroskopizität.

Tabelle IV

Hygroskopizität der untersuchten Bentonite, ausgedrückt durch den Wassergehalt, der nach Trocknung bei 105° C und Lagerung an der Raumluft bis zur Sättigung bestimmt wurde.

##### *unbehandelte Bentonite*

Bischofszell, obere Schicht . . . . .	15,0%
Bischofszell, untere Schicht . . . . .	15,5%
Bischofszell, Glastuff . . . . .	6,1%
Jonentobel . . . . .	15,3%
Heilsberg . . . . .	15,0%
Heiligenberg . . . . .	15,0%

##### *behandelte Bentonite*

K-Bischofszell, untere Schicht . . . . .	8,9%
Na-Bischofszell, untere Schicht. . . . .	9,0%
Na-Heilsberg . . . . .	10,8%

Die behandelten Bentonite waren mit den entsprechenden Alkalikarbonaten nach Abschnitt 5 behandelt worden.

Für den Glastuff ergibt sich aus dem Vergleich mit den reinen Bentoniten ein Tongehalt von rund 40%.

Im natürlichen Zustand zeigen alle Tone die ungefähr gleiche, relativ hohe Hygroskopizität. Die Alkali-Bentonite hingegen nehmen – trotz ihres hohen Quellvermögens – wesentlich weniger Wasser auf. Auch diese Feststellung entspricht den heutigen Ansichten führender Tonmineralogen (GRIM, 1953; HENDRICKS, NELSON & ALEXANDER, 1940). GRIM (1953) schreibt dazu:

«Numerous investigations have brought out the interesting fact, that Na montmorillonite, on drying at room temperature, tends to develop a single water layer between the silicate layers and that Ca montmorillonite under the same conditions tends to develop two water layers, whereas, at high relative humidities and in the presence of an abundance of water, Na montmorillonite sorbs by far the larger quantity of water.»

Aus den Zusammenstellungen von GRIM (1953) geht auch hervor, dass schon eine 30prozentige Absättigung der Basenaustauschkapazität mit  $\text{Ca}^{++}$  die Hydrationscharakteristiken von Ca-Bentonit bewirkt (Heilsberg!).

Werden bergfeuchte oder sonst übermäßig nasse Proben an der Luft getrocknet, so resultiert ein höherer Wassergehalt als bei vorher ofengetrockneten Proben, die durch Feuchtigkeitsaufnahme an der Luft abgesättigt sind (Tabelle V).

Tabelle V

	Bischofszell obere Schicht	Bischofszell untere Schicht
Wassergehalt nach Lufttrocknung bergfeuchten Tons	18,5%	18,5%
Wassergehalt ofengetrockneten Tons nach Sättigung an Raumluft	15,0%	15,5%

Diese interessante Hysteresis-Erscheinung kann auch an andern Bentoniten festgestellt werden.

Der Gleichgewichtszustand Wassergehalt/Raumluft hängt natürlich von der relativen Luftfeuchtigkeit und von der Temperatur ab, wenn auch die entsprechenden Schwankungen nicht sehr bedeutend sind.

### 7. Bindefähigkeit

Bentonite werden in bedeutendem Umfang als Formsandbindemittel in Giesereien verwendet. Die Bestimmung der Bindefähigkeit von Tonen, wie sie zur Qualitätsbeurteilung für Giessereizwecke üblich und wichtig ist, vermittelt wertvollen Aufschluss über die Eigenschaften von Bentoniten.

#### a) Versuchsmethodik

Zur Bestimmung der Bindefähigkeit von Tonen müssen dieselben mit einem homogenisierten Standard-Prüfsand gemischt werden. Zweckmässigerweise werden bei der Bentonitprüfung 100% Quarzsand und 5% Bentonit in stets gleichbleibenden Gewichten gemischt. Im vorliegenden Fall wurde ein belgischer, reiner Quarzsand (mittlere Korngrösse 0,26 mm, Verteilungskoeffizient 1,4) verwendet, wie er im Formstofflabor der Georg Fischer Aktiengesellschaft in homogenisierter Form als Prüfsand verwendet wird.

Es wurden je 2,5 kg Sand mit 125 g Bentonit (getrocknet bei 105° C, gemahlen und gesiebt > 0,1 mm) 1 Minute trocken und 5 Minuten feucht im Labormischer verarbeitet.

Mit jedem Bentonit wurden drei verschiedenen feuchte Mischungen hergestellt. Formsandmischungen haben einen bestimmten, formgerechten Wassergehalt, der an der fertigen Mischung durch Befühlen mit der Hand bei genügender Erfahrung mit grosser Sicherheit auf 1/10% abgeschätzt werden kann. Bei diesem formgerechten Wassergehalt hat die Sand-Bentonitmischung die geeignete Plastizität für Formzwecke, während bei wenigen Zehntelsprozenten Unterschied der Sand entweder zu feucht oder zu trocken ist.

Massgebend zur Beurteilung der gemessenen Eigenschaften ist dieser formgerechte Wassergehalt. Mischungen verschiedener Bentonite dürfen also keineswegs bei einem willkürlich festgelegten Wassergehalt beurteilt werden, weil der formgerechte Zustand bei verschiedenen Bentoniten bei verschiedenen Wassergehalten liegen kann (meist zwischen 2 und 2,7% unter der Voraussetzung der Verwendung reinen Quarzsandes und 5% Bentonitzusatz). Da die Eigenschaften von Formsandmischungen sehr stark vom Wassergehalt abhängig sind (GRIM, 1945/46, GÖTZ, 1951, 1954), ist die Kenntnis des formgerechten Wassergehaltes für die dazu ermittelten Eigenschaftswerte äusserst wichtig.

Die untersuchten Bentonitmischungen wurden nach minimal 12stündiger Lagerung in verschlossenen Behältern und nach erfolgtem Durchsieben auf den effektiven Wassergehalt geprüft, worauf die davon abhängenden technologischen Eigenschaften gemessen werden konnten.

Durch die intensive Knet- und Reibbearbeitung der feuchten Sand-Bentonitmischung werden auch die grobdispersen Bentonite im Labormischkollergang rasch zerteilt und entwickeln Bindeeigenschaften, die jenen natürlich feindispersen Bentonite nicht nachstehen. Versuche des Verfassers haben gezeigt, dass Bentonit der Körnung 0,2 bis 1 mm schon nach 5 Minuten feuchter Mischzeit so dispers ist, wie ein Na-Bentonit (Fig. 2). Handmischung zur Herstellung von Prüfmischungen ist nicht zulässig.

Aus den Mischungen wurden mit dem Rammapparat zylindrische Prüfkörper von 50 × 50 mm hergestellt. Der feuchte Sand wird durch dreimaliges Fallenlassen eines Gewichtes von 6666 g aus einer Höhe von 5 cm in einem Prüfkörperrohr von 5 cm Ø verdichtet. Dazu ist es nötig, das Einwaagegewicht des Sandes durch Vorversuche zu bestimmen, da es je nach der Verdichtungsfähigkeit (abhängig vom Wassergehalt, von der Körnung, vom Bentonit usw.) verschieden ist, um einen Prüfkörper von konstantem Volumen zu erzeugen.

An diesen Prüfkörpern werden sofort die Eigenschaften in feuchtem Zustand, nach Ofentrocknung diejenigen im getrockneten Zustand bestimmt (siehe GÖTZ, 1951, 1954).

Für sämtliche erwähnten technologischen Prüfungen und für die Herstellung der Mischungen wurden die Formsandprüfgeräte der Georg Fischer Aktiengesellschaft, Schaffhausen, verwendet, die auf dem Kontinent die weiteste Verbreitung besitzen.

### b) Versuchsergebnisse

Für den vorliegenden Fall interessierte besonders die Bindefähigkeit, ausgedrückt durch die Druckfestigkeit feucht («grün») und trocken beim formgerechten Ausgangszustand (Tabelle VI).

Tabelle VI

Bindefähigkeit der untersuchten Bentonite bei 5% Zusatz zu belgischem schlammstofffreiem Quarzsand.

Bentonittyp	Formgerechter Wassergehalt %	Druckfestigkeit feucht g/cm <sup>2</sup>	Druckfestigkeit trocken <sup>2)</sup> kg/cm <sup>2</sup>
<i>unbehandelte Tone</i>			
Bischofszell, oben . . .	2,6	890	2,2
Bischofszell, unten . . .	2,6	850	1,7
Jonentobel . . . . .	2,2	1190	3,4
Heilsberg . . . . .	2,2	850	4,6
Heiligenberg. . . . .	2,2	1070	3,9
<i>behandelte Tone</i>			
Na-Bischofszell, unten .	2,3	780	3,1
K-Bischofszell, unten .	2,3	700	1,4
Na-Heilsberg . . . . .	2,0	850	5,5

Die Na- resp. K-Bentonite wurden durch Behandlung dünnflüssiger Suspensionen in dest. Wasser durch Zusatz von 3% Na- resp. K-Karbonat hergestellt. Die Suspensionen wurden bei 110° C eingedickt und getrocknet, das erhaltene Produkt < 0,1 mm gemahlen und bei 105° C getrocknet.

Aus der Tabelle VI ergeben sich interessante Vergleiche. Auffallend ist, dass beide Bischofszeller Tone einen hohen formgerechten Wassergehalt benötigen, andererseits aber eine sehr geringe Trockenfestigkeit ergeben. Dies hängt wohl einerseits mit starker Ca<sup>++</sup>-Besetzung zusammen (siehe S. 123), vor allem aber wohl auch mit der mineralogischen Zusammensetzung, die aus den DTA-Kurven hervorgeht.

Na<sup>+</sup> hat keinen oder u. U. einen negativen Einfluss auf die Festigkeit in feuchtem Zustand, bewirkt aber die typische Steigerung der Trockenfestigkeit, während K<sup>+</sup> im vorliegenden Fall gegenteilig zu wirken scheint. Na<sup>+</sup> und K<sup>+</sup> vermindern den formgerechten Wassergehalt (siehe auch Tab. IV).

Die Eigenschaften nach Tabelle VI und die übrigen tonmineralogischen Charakteristiken zeigen teils sehr gute Übereinstimmung, teilweise ergeben sich aber tonmineralogische Phänomene (Zusammenhänge zwischen Grünfestigkeit, Trockenfestigkeit, Basenaustauschfähigkeit, DTA, Wasseraufnahme usw.), die auf Eigenschaften der Tone beruhen, die bei weitem noch nicht genügend erforscht sind.

Interessant ist die Tendenz der Abhängigkeit der Druckfestigkeit (feucht) von der Hygroskopizität (nach Tab. IV). In Figur 3 sind die unter gleichen Bedingungen

<sup>2)</sup> Prüfkörper bei 250° C 2 h getrocknet und im Exsikkator abgekühlt.

bestimmten Druckfestigkeiten der untersuchten Bentonite und derjenigen einer grösseren Zahl anderer Bentonite europäischer, nordafrikanischer und nordamerikanischer Provenienz in Funktion der Hygrokopizität dargestellt. Offensichtlich

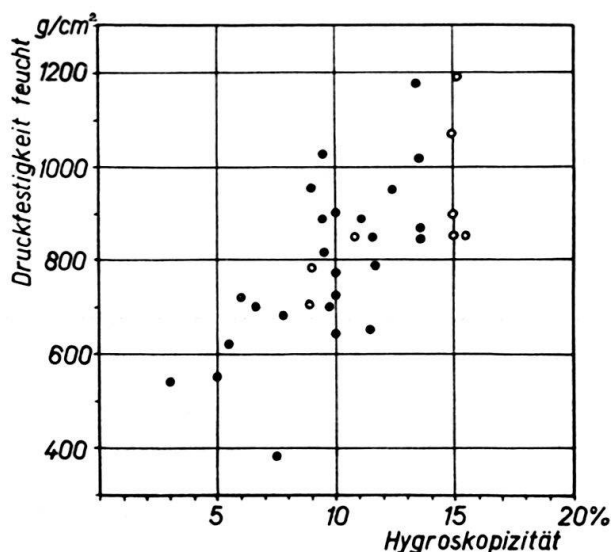


Fig. 3. Abhängigkeit der Druckfestigkeit (feucht) von der Hygrokopizität (Wassergehalt, entstanden durch Feuchtigkeitsaufnahme an der Raumluft bis zur Sättigung nach vorhergehender Ofentrocknung bei 105° C). Mischung: 100% Quarzsand, 5% Bentonit.  
Offene Kreise: untersuchte Bentonite (nat. und behandelt) n. Tabelle VI.  
Ausgefüllte Kreise: Vergleichsbentonite (europ., amerik., afrik.).

ist es so, dass ein zunehmender Gehalt an Adsorptionswasser mit einem zunehmenden Gehalt an hochbindefähigem Ton parallel geht. Wichtig ist die Feststellung, dass über etwa 11% Adsorptionswassergehalt keine Na-Bentonite mehr vorkommen. Nichtmontmorillonitische Tone (Kaolinite, Illite) schliessen sich in ihrem entsprechenden Verhalten zwangslos nach unten (kleinere Festigkeit, geringere Hygrokopizität) an.

#### 8. Mikroskopische Untersuchung der Mineralien des Schlammstoffrückstandes

##### a) Leichtminerale und Glimmer

In Tabelle VII sind die auftretenden Leichtminerale dargestellt. Man beachte in diesem Zusammenhang auch den effektiven Gehalt an Mineralkörnern  $> 20 \mu$  (Tab. II).

Tabelle VII

Auftreten von Leichtmineralien in der Fraktion  $> 20 \mu$  in den untersuchten Bentoniten.

	Quarz	Sanidin	Oligoklas- Andesin
Bischofszell, obere Schicht . . .	+	+	++
Bischofszell, untere Schicht . . .	+	++	+++
Jonentobel . . . . .	+	—	—
Heilsberg . . . . .	+	+	+++
Heiligenberg . . . . .	+	s	s

— nicht vorhanden, s sehr selten, + deutlich vorhanden, ++ relativ häufig, +++ vorherrschend

In einer vergleichsweise untersuchten Probe von *Landshut* (Bayern)<sup>3)</sup> bestand die Leichtmineralfraktion praktisch nur aus Quarzkörnern, deren Grösse und unreine Ausbildung die Herkunft aus Molassensanden beweist.

Die Quarze in den Bentoniten nach Tabelle VII sind sehr klein, frisch und durchsichtig. Quarzkörner aus Molassematerial wurden im Vorkommen Jonentobel beobachtet, vor allem aber in den übrigen Vorkommen der zürcherisch-aargauischen Molasse. In jedem Fall war der Gehalt aber äusserst gering. Bei den feldspatarmen Proben können Verwitterungserscheinungen, insbesondere bei stärkerer Exposition, mitgespielt haben (siehe auch Tab. II), wodurch eine Illitanreicherung erklärbar wäre (DTA, Fig. 1).

Der Bentonit des Jonentobels und der übrigen Vorkommen der dortigen Gegend und der Bentonit am Heiligenberg zeigen einen extrem hohen Biotitgehalt, der rund 90% oder mehr der Fraktion  $> 20 \mu$  ausmachen dürfte. Auch der Bentonit vom Heilsberg ist biotitreich, während der Biotitanteil bei den Bischofszeller Vorkommen weniger als 10% der genannten Fraktion ausmachen dürfte. Die Art des Biotits ist aber überall die gleiche. Der Landshuter Bentonit enthielt überhaupt keinen olivgrünen Biotit, sondern nur völlig farblosen Muskowit.

#### b) Schweremineralien

Die Zusammensetzung der durch Bromoformtrennung erhaltenen *Schweremineralfractionen* geht aus Tabelle VIII hervor.

Tabelle VIII  
Zusammensetzung der Schweremineralfractionen der untersuchten Bentonite

Bentonittyp	Apatit	Zirkon	Rutil	Erz	basalt. Hornblende	Turmalin
Bischofszell, oben .	28	47	3	22	—	—
Bischofszell, unten .	1	53	7	39	—	+
Jonentobel . . . .	63	23	—	8	6	—
Heilsberg . . . . .	4	38	8	50	—	—
Heiligenberg . . .	6	36	7	51	—	+

Durch wiederholtes Trocknen und Benetzen konnte ein Glastuff von Bischofszell soweit zerteilt werden, dass wenigstens einige Schweremineralien gewonnen werden konnten. Es wurden festgestellt: Zirkon, Rutil und Apatit. Eine Auszählung war jedoch nicht möglich.

*Apatit*: frisch, idiomorph, mittel- bis kurzprismatisch, mit Zirkoneinschlüssen.

*Zirkon*: frisch, idiomorph; bei Bischofszell, untere Schicht, Heilsberg und Heiligenberg mittel- bis sehr langprismatisch, sonst mittel- bis kurzprismatisch. Flüssigkeits- resp. Gaseinschlüsse.

*Rutil*: teils idiomorph, rel. langprismatisch, teils in Form von Trümmern. Rel. stark pleochroitisch.

*Erz*: teils Ilmenit, metallisch glänzend, teils gelbbraun, nicht- oder halbmatt glänzende Mineralien, dichttafelig, sechseckig.

Die Schweremineralfraktion des vergleichsweise untersuchten *Landshuter* Bentonits zeigt nicht den geringsten Anklang an die Verhältnisse von Tabelle VIII. Direkt-vulkanische Mineralien scheinen überhaupt zu fehlen. Es wurden festge-

<sup>3)</sup> Freundlicherweise durch Herrn Dr. H. A. HAUS, Überlingen, zur Verfügung gestellt.



stellt: 68% Granat, 10% Epidot, je 5% Staurolith und Disthen, 4% Apatit (abgerollt, molassisch), 4% Erz, 3% Hornblende. Zirkon wurde nur ein einziges Mal beobachtet. Bedeutend ist, dass diese Schweremineralkombination fast völlig identisch ist mit jener der Glimmersande im Unterseegebiet (Seerücken, vorvulkanisch, HOFMANN, 1955b) übereinstimmt. Der saure Landshuter Vulkanismus muss also Schichten durchschlagen haben, die durch die Glimmersandrinne mit den entsprechenden Ablagerungen im Bodenseegebiet in Verbindung standen und mit denselben identisch sind, ein Indiz für die Herkunft der Glimmersandrinne einerseits und für die ungefähre Festlegung der ostbayrischen Eruptionsstelle andererseits.

#### IV. INTERPRETATION DER VERSUCHSERGEBNISSE

##### A. Allgemeine Charakterisierung

Alle untersuchten Tone haben ähnlichen tonmineralogischen Charakter. Es sind schwach quellende Bentonite, wobei die Typen Jonentobel und Heilsberg die reinsten Sorten sind. Die durch Molassematerial infizierten Bischofszeller Vorkommen entstanden in einem geologisch weit unruhigeren Gebiet im direkten Einflussbereich der Hörnlichüttung. Besonders beim oberen Bischofszeller Ton ist eine sekundäre Infektion durch die überlagernden Molassemergel offensichtlich. Die übrigen Aschen wurden in entfernteren, sedimentationsmässig weit ruhigeren Gebieten deponiert.

Bei allen Vorkommen muss es sich um Material aus ein und derselben Eruptionsstelle handeln. Der Gehalt an nichttonigen Mineralkörnern deutet auf eine schwache Differentiation während der Eruptionen.

Die Bentonite des Bodensee-Zürichseegebietes sind aus windverblasenen Aschen ohne Wasserverschwemmung entstanden und deshalb sehr grobdispers.

Es ist anzunehmen, dass die Montmorillonitkristallisation auch hier während der Eruption erfolgte oder zumindest eingeleitet wurde (NEUWIRTH, 1953); nur so ist es erklärlich, dass beim Bischofszeller Vorkommen unter sonst gleichen Verhältnissen vollkommen reiner Bentonitton, nur teilweise montmorillonitisierter Glastuff und wieder reiner Bentonitton abgelagert wurden. Die Bedingungen zur Montmorillonitkristallisation scheinen also während der Eruptionen gewechselt zu haben (Wasserdampf, Temperatur). Ohne Zweifel entspricht der Glastuff von Bischofszell der Haupteruptionsphase, bei der vielleicht die sprunghaft verstärkte Aschenförderung mit einem Wasserdampfdefizit parallel ging.

Der Charakter der ausgeblasenen Aschen war andesitisch bis trachytisch.

##### B. Geologische Folgerungen

###### 1. Herkunft des Aschenmaterials

Die Abstammung der untersuchten Bentonite von Aschen der gleichen Eruptionsstelle dürfte auf Grund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse als gesichert angenommen werden können. Vergleiche mit irgendwelchen Hegaugesteinen zeigen deutlich, dass keinerlei Zusammenhang bestehen kann und dass

eine Herkunft aus Hegauschlotten auch für den Heilsberger Bentonit nicht in Frage kommen kann.

Die vergleichende Untersuchung eines Landshuter Bentonits zeigt ausserdem, dass ein Zusammenhang mit jenen Eruptionen ebenfalls für keines der untersuchten Vorkommen angenommen werden kann.

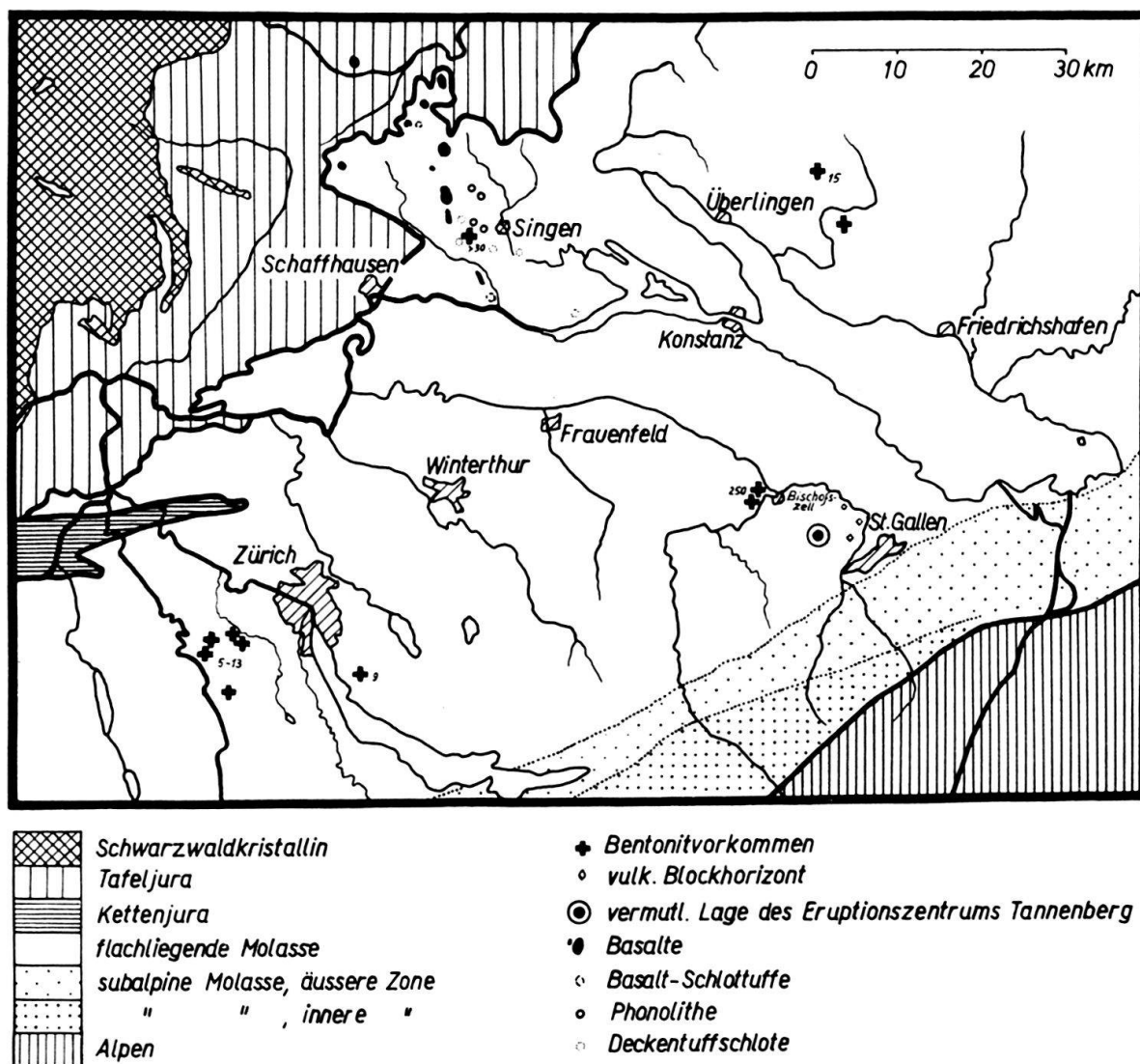


Fig. 4. Kartenskizze des Verbreitungsgebietes der Bentonite des sauren Tannenbergvulkanismus (Zahlen bei den einzelnen Vorkommen: Mächtigkeit in cm).

Die Eruptionsstelle kann nicht weit von den Bischofszeller Vorkommen gelegen haben. Darauf deutet die grosse Mächtigkeit der Aschenablagerungen von Bischofszell (2,5 m) gegenüber den geringen Mächtigkeiten der entfernten Vorkommen (um 10 cm). Durch Windverfrachtung wurden die Aschen über weite Distanzen verblasen, wobei eine gewisse Windsichtung eintrat. Auffallend ist z. B. der hohe Biotitanteil der entfernten Vorkommen. Den geringsten Einfluss hatte die Windsichtung offenbar beim Heilsberger Vorkommen (starke Eruptionsphase, starker Wind).



Der vom Verfasser 1945 im östlichen Tannenbergsgebiet N St. Gallen entdeckte vulkanische Blockhorizont dürfte in diesem Zusammenhang an Bedeutung gewinnen. Es erscheint als äusserst wahrscheinlich, dass jene Malmkalkauswürflinge das Resultat des ersten Durchschlags darstellen, dem die Ascheneruptionen folgten, die sehr kräftig gewesen sein müssen und sich mehrfach wiederholt haben (wenigstens 3 Phasen). Der Verfasser glaubt deshalb, annehmen zu können, dass die Eruptionsstelle unter dem Tannenbergs, NW St. Gallen liegt und dass die dortige merkwürdige Kuppelstruktur (HOFMANN, 1951; siehe auch Strukturkurvenkarte bei SCHUPPLI, 1952) mit dieser Eruptionsstelle in direktem Zusammenhang steht. Es ist sehr wahrscheinlich, dass der Blockhorizont stratigraphisch etwas tiefer liegt als die Bentonithorizonte, ähnlich, wie dies bei den bayrischen Horizonten der Fall ist (STEPHAN, 1952, 1955). Gross dürfte der Niveauunterschied nicht sein. Ebenso unwahrscheinlich ist es, dass die verschiedenen Bentonithorizonte niveaumässig wesentlich auseinanderliegen. Die Verhältnisse von Bischofszell sprechen dagegen.

## *2. Zeitliche Differenzierung der Aschenförderung*

Das Bischofszeller Vorkommen mit seiner grossen Mächtigkeit erlaubt einen guten Einblick in den Ablauf der Aschenförderung: die Schwermineralfraktionen zeigen eine starke Apatitzunahme von unten nach oben. Auch zahlreiche andere Indizien zeigen ähnliche Tendenzen.

Die entfernten Vorkommen lassen sich sehr gut in die Differentiationsabfolge von Bischofszell einordnen:

a) Heilsberg: Dieses Vorkommen entspricht in allen Teilen der liegenden Bischofszeller Schicht (Schwermineralkombination, langprismatische Zirkone, Leichtmineralien, Bindefähigkeit, Gehalt an Körnern  $> 20 \mu$ ). Dies und die vermutlich relativ grosse Mächtigkeit deutet auf eine kräftige Eruption und starken Windeinfluss. Bischofszell und Heilsberg ergeben eine sichere Richtungskomponente auf den Tannenbergs hin.

b) Heiligenbergs: Dieses Vorkommen ist ohne Zweifel eine stark windgesichtete Abart des Heilsberger Vorkommens. Die Schwermineralkombinationen sind völlig identisch. Die Armut an Feldspäten hängt vermutlich mit der Windrichtung zusammen, die Biotit anreicherte. Auch Verwitterungseinflüsse können mitgespielt haben (das Material von Heiligenbergs ist nicht sehr frisch zugänglich). Das Vorkommen entspricht jedenfalls mit jenem vom Heilsberg einer ersten Förderungsphase (Bischofszell Basis), wobei jedoch der Windeinfluss etwas anders war. Die atmosphärischen Verhältnisse müssen ja ohnehin auf die Art der Sedimentation der geförderten Aschen einen grossen Einfluss gehabt haben.

c) Zürich-Aargau: Diese Vorkommen, dargestellt am Beispiel Jonentobel, passen sehr gut zu einer etwas weiteren Differentiation der Phase, die die oberste Bischofszeller Schicht förderte (Apatitreichtum). Auch das Vorkommen vom Jonentobel und die verwandten Horizonte sind stark windgesichtet (Biotitvorkommt), weshalb der an sich geringe Feldspatgehalt (Bischofszell oben) nicht erfassbar ist. Die Art und Ausbildung der Schwermineralfraktion (eher kurzprismatische Zirkone!) passen sehr gut zur letzten Eruptionsphase von Bischofszell.

Die nach Westen verblasenen Aschen stellen offenbar das allerletzte Förderungsprodukt der Eruptionen dar.

Die Vorkommen W und E des Zürichsees ergeben wiederum eine Richtungskomponente gegen den Tannenbergr hin.

### *3. Das Alter des sauren Vulkanismus der Ostschweiz*

Das Vorkommen am Heilsberg im Hegau beweist eindeutig, dass der st. gallische Vulkanismus an den Beginn der Deckentufferuptionen im Hegau zu stellen ist. Der Blockhorizont an der Sitter dürfte der ersten Eruption entsprechen, die im Bodenseegebiet nachzuweisen ist. Jedenfalls sind heute die frühern Annahmen des Verfassers, dass die st. gallischen und die Hegau-Tuffvorkommen  $\pm$  gleichaltrig sind, bewiesen. Die vorliegenden Untersuchungen und die Verfolgung der Magnetituffite auf dem Seerücken und am Schienerberg haben diese Klärung herbeigeführt (HOFMANN, 1955a, 1956).

Die Asche des Hegaubentonits wurde jenseits der Glimmersandrinne im Vorfeld der Juranagelfluhen abgelagert. Der Heiligenberg-Bentonit liegt in alpinen Mergeln im Bereich der Glimmersandrinne, die zu jener Zeit kurzfristig völlig verschwand.

In Bischofszell lassen sich mit Sicherheit drei getrennte Ascheneruptionsphasen nachweisen. Die Differentiation und der Vergleich mit den entfernten Vorkommen zeigen aber, dass alle Bentonithorizonte mehr oder weniger gleichaltrig sind, dass also die Ascheneruptionen kurzfristig waren, jedenfalls in nachweisbarer Form. Es ist natürlich nicht ausgeschlossen, dass detaillierte tonmineralogische Untersuchungen an Molassemergeln Indizien vorbringen könnten, wonach der saure Vulkanismus weiter zurück gereicht haben könnte (LEMCKE & Mitarb., 1953).

Die Untersuchungen des Verfassers im Hegau (HOFMANN, 1956) haben immerhin gezeigt, dass die vulkanische Tätigkeit in der höhern OSM mehrere verschiedene Phasen umfasst, die bis zum Ende der Molassezeit nachweisbar sind.

### *4. Beziehungen des sauren Beckenvulkanismus zur Tektonik*

Auffallend ist, dass der saure Glasaschenvulkanismus im Innern des Molassebeckens sowohl in der Ostschweiz wie in Bayern (STEPHAN, 1955; ELBERSKIRCH & LEMCKE, 1955) hinter der Schwelle liegt, die den alpinen Sedimentationsbereich der Molasse von jenem der nördlichen Rinnenzone trennte (Ost-West-Schüttung). Ohne Zweifel wurde der saure Beckenvulkanismus durch tektonische Bewegungen ausgelöst, und der Verfasser glaubt, dass seine Annahme, wonach Jura-Aufschichtung, Albsteinschwelle, Graupen- und Glimmersandrinne ursächlich zusammenhängen, eine weitere Stütze erfahren hat (HOFMANN, 1955). Damit erklärt sich vielleicht der grundsätzlich verschiedene Chemismus zwischen Beckenvulkanismus und Vorlandvulkanismus.

### Wichtigste Literatur

- ABELE, G., FUCHS, B., & STEPHAN, W. (1955): *Die westliche bayrische Vorlandmolasse*. Erläut. geol. Übersichtsk. süddtsch. Mol. (München).
- BÜCHI, U. P. (1956): *Über ein Vorkommen von Montmorillonit in der zürcherisch-aargauischen Molasse*. Bull. Ver. Schweizer. Petrol. Geol. Ing., 23/63.
- ELBERSKIRCH, W., & LEMCKE, K. (1955): *Zur Tektonik der nordalpinen Molassesenke*. Z. deutsche geol. Ges., Jg. 1953, 105/3.
- ENDELL, K., LOOS, W., MEISCHEIDER, H., & BERG, V. (1938): *Über Zusammenhänge zwischen Wasserhaushalt der Tonminerale und bodenphysikalischen Eigenschaften bindiger Böden*. Veröff. Inst. deutschen Forschungsges. Bodenmech. TH Berlin, 5.
- ENDELL, K., & VAGELER, P. (1932): *Der Kationen- und Wasserhaushalt keramischer Tone im rohen Zustand*. Ber. Deutsche Keram. Ges., 13/9.
- GÖTZ, W. (1951): *Kritische Betrachtungen zur Normprüfung für Formsande*. Schweizer Archiv angew. Wiss. Techn., 17/8.
- (1954): *Sinn und Zweck der Formsandprüfung* (Schaffhausen).
- GRIM, R. E., & CUTHBERT, F. L. (1945): *The Bonding Action of Clays, Part I: Clays in Green Molding Sand*. Univ. Illinois Bull., 42/50.
- (1946): *The Bonding Action of Clays, Part II: Clays in Dry Molding Sands*. Univ. Illinois Bull., 43/36.
- GRIM, R. E. (1953): *Clay Mineralogy* (New York).
- HENDRICKS, S. B., NELSON, R. A., & ALEXANDER, L. T. (1940): *Hydration Mechanism of the Clay Mineral Montmorillonite Saturated with Various Ions*. J. Am. Chem. Soc. 62.
- HOFMANN, F., GEIGER, TH., & SCHWARZACHER, W. (1949): *Über ein Vorkommen von Montmorillonit in der ostschweizerischen Molasse*. Schweiz. min.-petr. Mitt., 29/1.
- HOFMANN, F. (1951): *Zur Stratigraphie und Tektonik des st. gallisch-thurgauischen Miozäns und zur Bodenseegeologie*. Ber. Tätigkeit st. gall. naturw. Ges., 74.
- (1955a): *Neue geologische Untersuchungen in der Molasse der Nordostschweiz*. Eclogae geol. Helv., 48/1.
- (1955b): *Beziehungen zwischen Tektonik, Sedimentation und Vulkanismus im schweizerischen Molassebecken*. Bull. Ver. Schweizer. Petrol. Geol. Ing., 22/62.
- (1956): *Die vulkanischen Erscheinungen auf schweizerischem Gebiet nördlich des Rheins in der Gegend von Ramsen (Kt. Schaffhausen)*. Eclogae geol. Helv., 49/1.
- HOFMANN, U., ENDELL, K., & WILM, D. (1933): *Kristallstruktur und Quellung von Montmorillonit*. Z. Krist., 86.
- IBERG, R. (1954): *Beitrag zur Kenntnis von Tonmineralien einiger schweizerischer Böden*. Mitt. Schweiz. Anst. forst. Versuchswesen, 30.
- JASMUND, K. (1951): *Die silicatischen Tonminerale*. Monogr. zu «Angew. Chemie» und «Chemie-Ing.-Technik», 60 (Weinheim).
- LEMCKE, K., v. ENGELHARDT, W., & FÜCHTBAUER, H. (1953): *Geologische und sedimentpetrographische Untersuchungen im Westteil der ungefalteten Molasse des süddeutschen Alpenvorlandes*. Bei. Geol. Jb., 11 (Hannover).
- NEUWIRTH, E. (1953): *Zur Petrographie einiger Bentonitvorkommen aus Steiermark, Kärnten und Italien (Ponza)*. Tschermaks min.-petr. Mitt., 3/2.
- (1953): *Zur Montmorillonitbildung aus vulkanischen Gläsern*. Berg- u. Hüttenmänn. Monatshefte, 98/11.
- PALLMANN, H. (1938): *Zur physikalischen Chemie des Bodens*. Erdbaukurs ETH. (Zürich).
- SALMANG, H. (1954): *Die physikalischen und chemischen Grundlagen der Keramik* (Berlin/Göttingen/Heidelberg, 3. Aufl.).
- SAVELLI, F. (1943): *La Bentonite – le argille colloidalì e le loro applicazioni scientifiche ed industriali* (Milano).
- SCHUPPLI, H. M. (1952): *Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, IV*. Mit einem Beitrag von F. HOFMANN. Beitr. Geol. Karte Schweiz, Geotechn. Serie 26/4.
- SIEGL, W. (1948): *Glastuff in der oberbayrischen Molasse und seine Beziehung zur Bleicherde*. N. Jb. Min. usw., Mh. 1945–1948, A.

- STEPHAN, W. (1952): *Ein tortoner vulkanischer Brockhorizont in der Obern Süsswassermolasse Bayerns*. *Geologica Bavarica*, 14.
- (1955): *Über den Vulkanismus in der OSM*. Erläut. geol. Übersichtsk. süddeutschen Mol. (München).
- VINTHER, E. H., & LASSON, M. L. (1933): *Über Korngrössenmessungen von Kaolinen- und Tonarten*. *Ber. Deutsche Keram. Ges.*, 14/7.

#### Geologische Karten

- Geologische Generalkarte der Schweiz, 1:200 000, Bl. 3, Zürich–Glarus*. Schweiz. Geol. Komm. (P. CHRIST & W. NABHOLZ), 1950.
- Geologische Übersichtskarte der süddeutschen Molasse, 1:300 000*. Bayer. Geol. Landesamt, 1954.
- Geologische Spezialkarte von Baden, 1:25 000, Blatt Hilzingen (Nr. 146, L. ERB)*.

Manuskript eingegangen am 6. Februar 1956.

---

